



## ホログラフィック・フィルターを用いた光論理演算

高木 康博・大頭 仁

早稲田大学理工学部応用物理学科 〒160 東京都新宿区大久保 3-4-1

(1986年12月8日受理)

### Optical Logic Operations by Holographic Filters

Yasuhiro TAKAKI and Hitoshi OHZU

Department of Applied Physics, School of Engineering, Waseda University,  
3-4-1, Okubo, Shinjyuku-ku, Tokyo 160

In order to realize an optical digital computer, optical gates are essential as main components. In this paper, optical gates using holographic filters are discussed. Hologram has the advantage of parallel processing, and the capacity of synthesizing any wave front. Such special holograms are easily obtained by a computer generated hologram. It is found that all kinds of logic operations of two variables are optically performed by this method, where an adequate wave front is supplied to each variable and added at the output plane. Since its fairly easy operating principle, this method may have a great potential to be applied in a large area of optical computing. In this paper, operating principle and experiment of optical gates using holographic filter are discussed.

#### 1. はじめに

光計算機を実現するための方法として、光計算機独自のアーキテクチャを考えるというアプローチがあるが、本研究では、電子計算機と同様に光計算機を実現するにあたって、その最小の構成要素は論理演算を行なうゲートであるという立場をとる。

このような光デジタル計算機の構成デバイスとしての光ゲート実現のために、PROM, BSO, LCLV, MSLMなどのさまざまな空間光変調器を用いた研究がなされている。その多くは電気光学効果、磁気光学効果や音響光学効果を用いており、直接に光で光をコントロールできない。あるいは、一つの論理演算を行なうために数ステップを要し実行時間処理ができないなどの欠点もある。また、最近では純光学的な光双安定素子<sup>1)</sup>あるいは投影光学系<sup>2)</sup>を用いた全光学的な光計算機の研究も進められている。

本研究においては、種々の光学的特徴を有し、従来から光情報処理の分野で広く用いられてきたホログラムの光論理演算への応用を考えた。ホログラムを用いた光論

理演算としては、すでに Bertelt ら<sup>3)</sup>と Fu ら<sup>4)</sup>の研究があるが、本研究においては、全光学的な光論理演算を目的として、ホログラフィック・フィルターを用いることにより並列性、高速性を確保しつつ 16 種類の論理演算がすべて実現されることを示す。本方法を用いることにより、二つの光信号の同時入力に対して、その論理演算の結果を再び光で出力することができる。

また、動作原理が簡単であるため、光コンピューティング以外の分野にも応用範囲が広いと思われる。

#### 2. 原 理

##### 2.1 ホログラフィック・フィルターの光論理演算への応用

ホログラフィック・フィルターは、その空間周波数特性により光の波面を任意に加工することができる。これは、ホログラムに、希望する波面のフーリエ変換されたパターンを書き込んでおけばよい。このような特殊な空間周波数特性をもつホログラムは、計算機ホログラム<sup>5)</sup>(以下、CGH と略す)により容易に合成できる。二つの論理入力として  $x, y$  を考える。ここで、論理の 0, 1



パラメータ  $a, b, c$  が求められる。一例として, NAND の論理演算を実行するためのパラメータ  $a, b, c$  を求めてみる。

$$|b|^2=1 \tag{1}$$

$$|a+b|^2=1 \tag{2}$$

$$|b+c|^2=1 \tag{3}$$

$$|a+b+c|^2=0 \tag{4}$$

ここで, パラメータ  $a, b, c$  を複素数  $A_k \exp(j\theta_k)$  ( $k=a, b, c$ ) で表わして,

$$|A_a \exp(j\theta_a)|^2=1 \tag{5}$$

$$|A_a \exp(j\theta_a)+A_b \exp(j\theta_b)|^2=1 \tag{6}$$

$$|A_b \exp(j\theta_b)+A_c \exp(j\theta_c)|^2=1 \tag{7}$$

$$|A_a \exp(j\theta_a)+A_b \exp(j\theta_b)+A_c \exp(j\theta_c)|^2=0 \tag{8}$$

となり, この連立方程式を解けばよい。この方程式の解は, Fig. 3 に示すような図的考察を行なうことによって簡単に解け,

$$a=\exp(j2/3\pi) \tag{9}$$

$$b=1 \tag{10}$$

$$c=\exp(-j2/3\pi) \tag{11}$$

のように求まる。しかし, AND,  $\bar{x}\cdot y, x\cdot\bar{y}$ , NOR 演算については, このような計算でパラメータ  $a, b, c$  を求めることはできない。これらの四つの論理演算に関しては, 1 となるべき出力と 0 となるべき出力の比が最大になるようにする。このようにして求めたパラメータ  $a, b, c$  を Table 3 (b) に示す。また, このパラメータで計算したときの出力の論理 1 と論理 0 の値を同表(c) に示す。出力の論理 0 が完全に 0 とならない論理演算の出現が問題点として残る。しかし, 同表にみられるよう

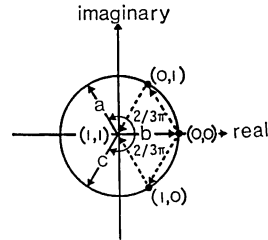


Fig. 3 Schematic method of solution for Eqs. (1)-(4).

Table 3 Optical 16 logic operations.

(a) Output amplitude

$x$	$y$	Amplitude
0	0	$b$
0	1	$a+b$
1	0	$b+c$
1	1	$a+b+c$

(b) Operating parameter for 16 logic operations

Operation	$a$	$b$	$c$
$F$	0	0	0
AND	$2/3$	$-1/3$	$2/3$
$x\cdot\bar{y}$	$-2/3$	$1/3$	$2/3$
$x$	0	0	1
$\bar{x}\cdot y$	$2/3$	$1/3$	$-2/3$
$y$	1	0	0
XOR	1	0	-1
OR	$\exp(j2/3\pi)$	0	$\exp(-j2/3\pi)$
NOR	$-2/3$	1	$-2/3$
$\overline{XOR}$	-1	1	-1
$\bar{y}$	-1	1	0
$x+\bar{y}$	-1	1	$\exp(j2/3\pi)$
$\bar{x}$	0	1	-1
$\bar{x}+y$	$\exp(j2/3\pi)$	1	-1
NAND	$\exp(j2/3\pi)$	1	$\exp(-j2/3\pi)$
$T$	0	1	0

(c) Output power for 16 logic operations

Operation	Logical 1	Logical 0
$F$	—	0
AND	1	$1/9$
$x\cdot\bar{y}$	1	$1/9$
$x$	1	0
$\bar{x}\cdot y$	1	$1/9$
$y$	1	0
XOR	1	0
OR	1	0
NOR	1	$1/9$
XOR	1	0
$\bar{y}$	1	0
$x+\bar{y}$	1	0
$\bar{x}$	1	0
$\bar{x}+y$	1	0
NAND	1	0
$T$	1	—

に 1/9 という値であるので、閾値フィルターを設定することによって簡単に 0 と 1 を弁別することが可能と考えられる。

このようにして光論理ゲートが実現されれば、その組合せにより光回路<sup>6,7)</sup>の構成が考えられるが、その検討は別報<sup>8)</sup>に報告する。

### 3. 実 験

本研究の実証のために基本的な実験を行なった。本実験では Fig. 4 に示すような space-invariant な系を用いた。Space-invariant な系とは、同図に示すような 1 枚のホログラムで構成するものである。ここで使うホログラムは、Fig. 5 (a) のようなコード変換フィルターである。ここで、 $a, b, c$  は Table 3 (b) で計算した

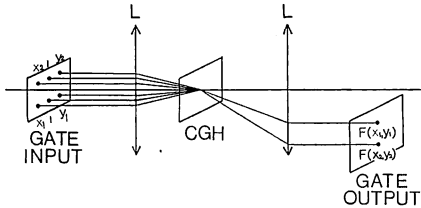


Fig. 4 Space-invariant system (L. lenses).

パラメータである。つまり、1 の入力に対して空間的に  $a, b, c$  と広がるような point-spread function を有するフィルターと考えてよい。このフィルターに Fig. 5 (b) のような位置で、入力  $x, y$  および定常入力 1 を入れると、同図(a)の point-spread function が重なり合い、同図(b)に示すように、出力面における重なり合った像の中心位置では Table 3 (a) と同じ波面を作ることがわかる。このことを光路で示すと、Fig. 5 (c) のようになる。よって、この三つの point-spread function の重なり合う出力像の中心位置のみを透すようなマスクを置けば、論理演算の結果がとりだせる。このフィルターの空間周波数特性は、一般に次のようになる。

$$F(\nu_x, \nu_y) = a \cdot \exp(j2\pi\nu_x) + b + c \cdot \exp(-j2\pi\nu_x) \tag{12}$$

Table 3 (c) のパラメータを上式に入れて計算すれば、それぞれの論理演算に必要なコード変換フィルターの空間周波数特性が求まる。

実際に用いた実験系を Fig. 6 (a) に示す。光源としては、波長 514 nm の Ar-ion レーザーを用いた。レンズの焦点距離は 400 mm である。

フィルターは計算機ホログラム (CGH) により作成し

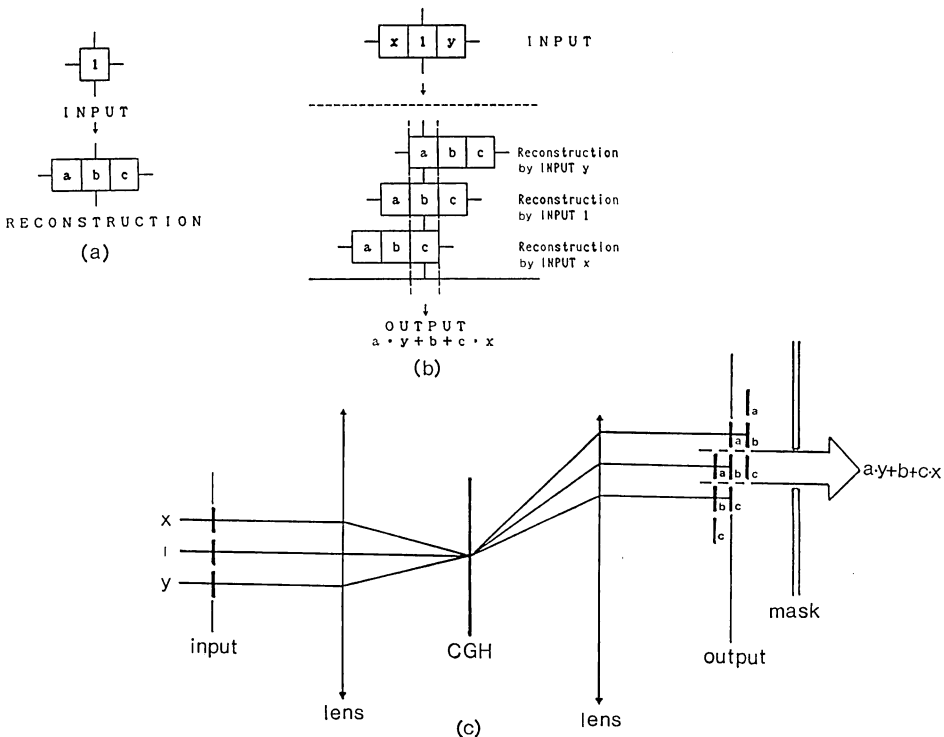


Fig. 5 Realization of 16 optical logic operations. (a) code transformation, (b) operating principle, (c) schematic diagram of optical path.

た. CGH は,  $64 \times 64$  のサンプリング点数の Lohmann 型バイナリーホログラムを用いた. Lohmann 型バイナリーホログラムとは, 全体を小さなセルで構成し, その各セルごとにあけられた穴の大きさと振幅を表わし, 位置で位相を表わしたものである. これにより, 空間周波数 ( $\nu_x$ ) で  $-2\lambda f$  から  $2\lambda f$  までを記録した. そのホロ

グラム原図を Fig. 7 に示す. これを  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$  に写真縮小して用いた. ただし,  $F, T$  の論理演算はフィルターの空間周波数特性は  $F=0, F=1$  となるのであえて作成しなかった. 入力パターンとしては, Fig. 6 (a) に実際の光学系, フィルターおよび入力パターンの関係を示す. 入力  $x, y$  が論理 0 あるいは 1 をとったときの 4 種類の入力を同時にフィルムに記録したものをを用い, これらを並列に入力した. 入力パターンの, 上から 1 段目が  $x=0, y=0$  の入力, 2 段目が  $x=0, y=1$ , 3 段目が  $x=1, y=0$ , 最後の 4 段目が  $x=1, y=1$  の入力である. また, 出力面には, 論理演算の結果が出る三つの point-spread function の重なり合った中心位置のみ透過するようなマスクを置いた. この 4 種類の入力に対する出力とマスクの関係を示す. Fig. 6 (b) に示す. これより, 入力  $x=0, y=0$  の場合は出力として波面  $b$  が,  $x=0, y=1$  の場合は波面  $a+b$  が,  $x=1, y=0$  の場合は波面  $b+c$  が,  $x=1, y=1$  の場合は波面  $a+b+c$  が出力される.

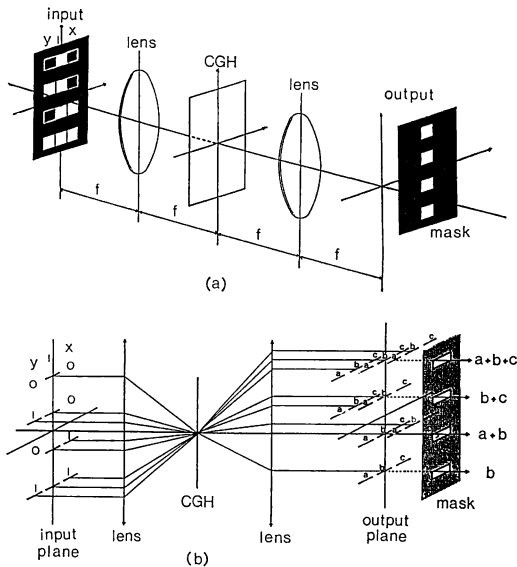


Fig. 6 Experimental system. (a) experimental setup, (b) explanation for the setup.

#### 4. 結果と考察

実験結果を, Fig. 8, 9 に示す. ただし,  $F, T$  の論理演算の結果は除いてある. Fig. 8 は各論理演算に対応したフィルタリングの出力像をそのまま写真に撮影したもので, Fig. 9 は出力点のみを透過マスクを置いた

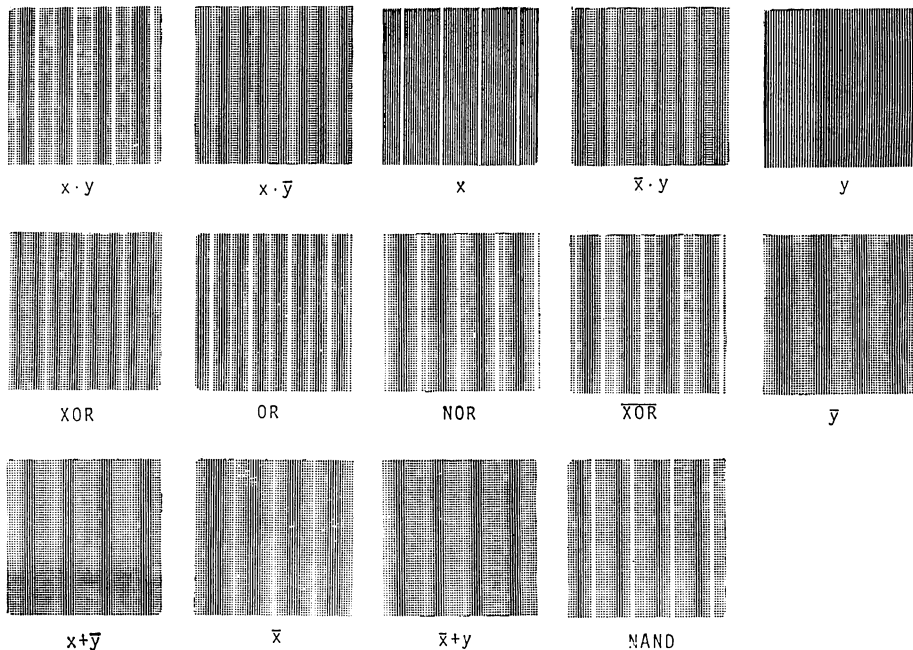


Fig. 7 Magnified patterns of holographic filters made by Lohmann type binary CGH.

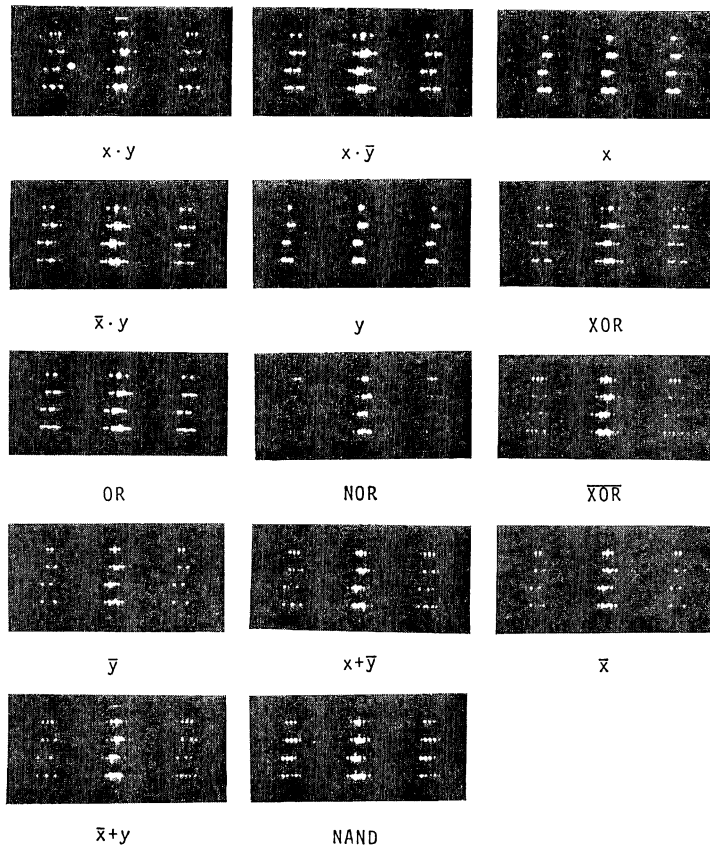


Fig. 8 Experimental results of logic operations without mask.

ものである。

Fig. 8 の真中の1列が0次回折光, 右側の列が1次の回折像, 右側の列が-1次の回折像である。1次の回折像が本実験の結果である。この1次の回折像についてみると, 各論理演算ごとに4段の結果が出ているが, 上から1段目が  $x=0, y=0$  のときの演算の結果であり, 2段目が  $x=0, y=1$ , 3段目が  $x=1, y=0$ , 4段目が  $x=1, y=1$  のときの演算の結果である。

Fig. 9 は, Fig. 8 の1次の回折像の結果の出力ポイントにマスクを置いたときの結果で, それぞれの位置での入力  $x, y$  の値は Fig. 8 の場合と同様である。たとえば, XOR 演算についてみると, 入力が  $x=1, y=0$  のときと  $x=0, y=1$  のときには光が出ていて,  $x=0, y=0$  のときと  $x=1, y=1$  のときには光が出ていないのがわかる。これは, Table 2 の真理表のとおりになっている。他の演算についても同様のことがいえる。

これらの結果から必要と考えられるすべての論理演算が実現されていることがわかる。ただし, Fig. 9 で, Table 2 に従えば, 本来光が出てはいけない場所で弱い

光が出ている所がある。これは, 実験系の微調整の不備によるものであり, 根本的な原理の誤りによるものではないと思われる。また, 出力像は本来完全な四角形になるべきであるが, これが円みを帯びた形になったのは実験に用いた CGH の大きさは  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$  であり高い空間周波数を十分にフィルタリングできず, エッジ部分を再生する高周波数成分が低減しているためと思われる。

## 5. 結 語

以上, 本論文ではホログラフィック・フィルターの光論理演算への応用について述べ, CGH によるフィルタリングにより 16 種類の必要な論理演算を全光学的に行なうことが可能なことを示した。最後に本方法の長所と短所を述べると次のようになる。

長所としては, 次のようなものがある。

- (a) 光のみで光論理演算が実行できる。
- (b) 実時間処理ができる。
- (c) 並列性がある。

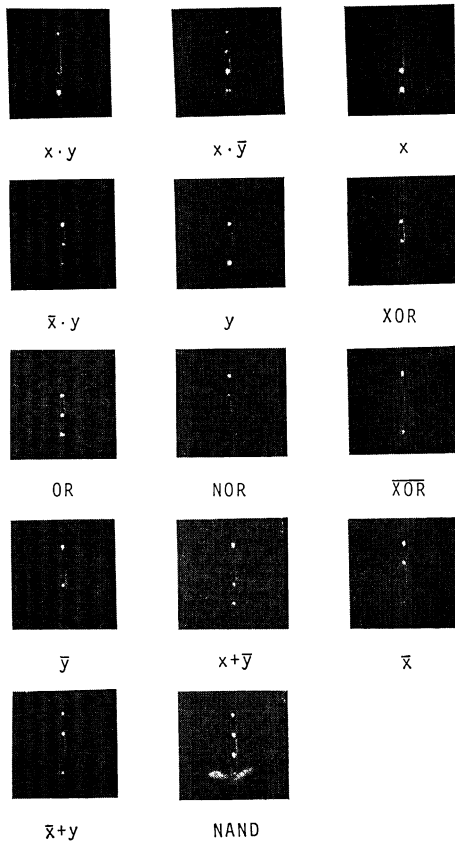


Fig. 9 Experimental results of logic operations with mask.

短所としては、次のような点があげられる。

(d) 別報に述べるように、これにより光回路を構成する場合、位相をそろえ光量を増すために空間光変調器などが必要となり、動作速度がそれにより制限される。

本研究の遂行に当たり、早稲田大学理工学部の小松進一教授からいろいろ有益なアドバイスを受けたことに感謝する。

文 献

- 1) S. D. Smith, I. Janoss, H. A. Mackenzie, J. G. H. Mathew, J. J. E. Rein, M. R. Taghizaden, F. A. P. Tooley and A. C. Walker: "Nonlinear optical circuit elements as logic gates for optical computer," *Opt. Eng.*, **24** (1985) 569-574.
- 2) J. Tanida and Y. Ichioka: "Optical logic array processor using shadowgrams," *J. Opt. Soc. Am.*, **73** (1983) 800-809.
- 3) H. Bertelt, A. W. Lohmann and E. E. Sicre: "Optical logical processing in parallel with theta modulation," *J. Opt. Soc. Am. A*, **1** (1986) 944-951.
- 4) Fu zi-ping, Hsu Da-hsing and Wang Ben: "Real-time optical digital operations using grating filtering," *ICHA '86* (1986).
- 5) A. W. Lohmann and D. P. Paris: "Binary Fraunhofer holograms, generated by computer," *Appl. Opt.*, **6** (1967) 1739-1748.
- 6) B. K. Jenkins, A. A. Sawchuk, T. C. Strand, R. Forchheimer and B. H. Soffer: "Sequential optical logic implementation," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3455-3464.
- 7) B. K. Jenkins, P. Chavel, R. Forchheimer, A. A. Sawchuk and T. C. Strand: "Architectural implications of a digital optical processor," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3465-3474.
- 8) 高木康博, 大頭 仁: "ホログラムを用いた光論理回路の構成", 光学, 投稿中.